干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2018.05.22

上海市 $PM_{2.5}$ 浓度变化特征及其气象因子分析①

王祎頔[1,2]， 王真祥[3]

（1 华东师范大学地理科学学院，上海 200241； 2 Dept. of Ecosystem Science and Sustainability, Colorado State University, CO 80521, USA； 3 长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局，上海 200136）

摘 要： 对上海市2012—2016年 $PM_{2.5}$ 质量浓度、气象因素数据资料进行整理统计，通过定性分析与定量计算相结合的方法，揭示近年来上海市 $PM_{2.5}$ 浓度的变化特征及其污染状况；采用相关性分析，从温度、气压、相对湿度、风向、风速和降水量等方面探讨了 $PM_{2.5}$ 浓度与气象因素之间的关联性。结果表明：上海市近5 a空气质量主要为优和良，污染天数所占全年比例在减少。$PM_{2.5}$ 浓度呈现出夏季低，冬季高的季节特征，而且8月 $PM_{2.5}$ 浓度最低，处于16～36 $\mu g \cdot m^{-3}$；$PM_{2.5}$ 的日变化呈现出双峰双谷结构，浓度峰值出现于8～9时和19～20时，且后者浓度更高。气温、气压、相对湿度的阈值分别出现在9.8 ℃、1 021.6 hPa、83 %，最大 $PM_{2.5}$ 在阈值处出现显著变化；最大 $PM_{2.5}$ 浓度与累积风速和降水量呈现出对数关系，并且东北风和东南风的累积风速达到350 $m \cdot s^{-1}$ 以上时，$PM_{2.5}$ 浓度基本减少至35 $\mu g \cdot m^{-3}$；降水量越大，$PM_{2.5}$ 浓度越低。

关 键 词： $PM_{2.5}$ 浓度；污染特征；气象因素；相关性
中图分类号： X16　　**文献标识码：** A　　**文章编号：**

近年来，上海市及其周边经济快速发展和城市化水平的不断提高，雾霾天气频发，已严重污染了城市环境，居民身心健康存在诸多潜在危害，大气环境污染问题已成为社会高度重视的热点问题。在众多大气污染物中，大气颗粒物作为凝结核，为雾霾的形成提供了必要的物质条件[1]。而可吸入颗粒物中的细颗粒物（$PM_{2.5}$）作为雾霾的重要污染物之一，因其粒径较小，比表面积大，更容易富集有毒物质，对人体危害远比粗颗粒物大，因此备受人们关注。大量研究表明，$PM_{2.5}$ 质量浓度受湿度、风速、风向、降水等气象因子的影响，并且具有明显的季节变化特征[2]。气象因素对 $PM_{2.5}$ 的扩散、稀释和积累有着重要作用，同步分析气象因素与污染物浓度的关系不仅能验证并合理解释试验数据，还对研究当地雾霾形成的气象条件与预报具有基础性的意义[3]。本文借助空气质量在线监测分析平台和中国气象局提供的公开气象数据，结合相关文献的整理分析，对上海市2012—2016年 $PM_{2.5}$ 浓度与气象因子之间的关系进行分析，揭示近年来该地区 $PM_{2.5}$ 浓度的演变规律并分析其气象影响机制，为城市空气质量预报和大气环境治理提供了数据支撑和理论依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究数据来源于美国驻上海领事馆在2012—2016年期间监测的 $PM_{2.5}$ 逐时浓度数据，并对其中的少量缺失值采用线性内插法进行补充。气象因素数据项包括气温、气压、相对湿度、风速、风向与降水量等同期历史数据均来自 Reliable Prognosis 5 网站，采用上海宝山站、虹桥机场站在2012—2016年内所提供的数据。通过计算两个气象站提供的气温差、气压差、相对湿度差和风速差的平均值和标准差，认为两者提供的气象数据基本一致，均可真实反映上海的气象条件。

1.2 研究方法

通过基本的统计分析，寻找不同时间尺度下 $PM_{2.5}$ 浓度的时间分布特点，包括年际变化、年变化和日变化情况。采用相关性分析，进一步量化气温、气压、相对湿度、风向、风速和降水量等气象影响因

① 收稿日期：2018－04－20； 修订日期：2018－07－19
基金项目：华东师范大学大夏大学生科研基金（2015DX－349）
作者简介：王祎頔（1995－），男，本科生．E-mail：cjkwangzx@126.com

素与 $PM_{2.5}$质量浓度之间的关系,同时找出相关性发生变化处的气象因素阈值,并探讨数据中的典型值($PM_{2.5}$浓度或气象因素的最大值或最小值)所对应阈值的成因。

2 结果与分析

2.1 上海市 $PM_{2.5}$浓度变化特征

2.1.1 年际变化情况 根据最新版《环境空气质量标准》(GB3095—2012)中 $PM_{2.5}$日平均浓度和空气质量等级的对应关系,将 $PM_{2.5}$日平均浓度分为优($PM_{2.5}$日平均浓度不超过 35 μg·m^{-3})、良($PM_{2.5}$日平均浓度大于 35 μg·m^{-3}但不超过 75 μg·m^{-3})和污染($PM_{2.5}$日平均浓度大于 75 μg·m^{-3})3 种状态[4]。按此标准,以年为时间尺度来统计各年的空气质量为优、良及污染的天数,以此来分析上海市 $PM_{2.5}$浓度的年际变化规律。

2012—2016 年,上海大部分时间的空气质量为优和良,空气质量达到污染水平的天数占全年的 15% ~26%。上海的 $PM_{2.5}$污染情况总体基本持平,但呈细微的改善趋势(图 1)。除 2013 年严重空气污染以外,空气质量为优的天数比例在逐年增加,而污染的天数比例则在减少。与 2012 年相比,2016 年空气为优的天数增加了 12 d,而污染的天数减少了 31 d。

在全球范围内,《环境空气质量标准》(GB3095—2012)对 $PM_{2.5}$日平均浓度的等级划分仍宽松于平均水平[5]。因此,根据美国国家环境空气质量标准(NAAQS),重新将 $PM_{2.5}$日平均浓度分为优($PM_{2.5}$日平均浓度不超过 12 μg·m^{-3})、良($PM_{2.5}$日平均浓度大于 12 μg·m^{-3}但不超过 35 μg·m^{-3})和污染($PM_{2.5}$日平均浓度大于 35 μg·m^{-3})3 种状态[6],并重新进行统计(图 2)。在该标准下,2012—2016 年上海空气质量的变化趋势基本与中国标准下的变化趋势一致,但每年空气质量达到污染水平的天数均过半,且空气质量为优的天数下降到仅占全年的 2% ~8% 。

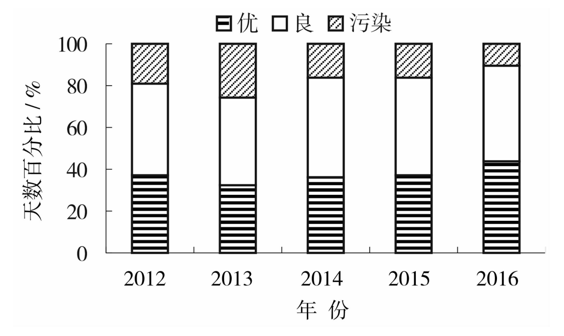


图 1 2012—2016 年上海市空气质量处于优、良和污染状态下的天数比例(以中国标准)

Fig. 1 Proportions of days on which Shanghai is in excellent, good and polluted air quality status during 2012—2016 (based on Chinese standard)

2.1.2 年变化情况 根据上海 $PM_{2.5}$的污染特点,参照中国 $PM_{2.5}$日平均浓度和空气质量等级的对应关系(GB3095—2012),以季节和月为时间尺度,分别计算了上海空气质量处于优、良和污染状态的小时数,以及不同时间尺度下的 $PM_{2.5}$浓度平均值,以此分析上海市 $PM_{2.5}$浓度的年变化规律。

上海市 $PM_{2.5}$浓度具有清晰的年变化规律。按照 3 ~5 月为春季,6 ~8 月为夏季,9 ~11 月为秋季,12 ~2 月为冬季的原则,可将一年划分为持续时

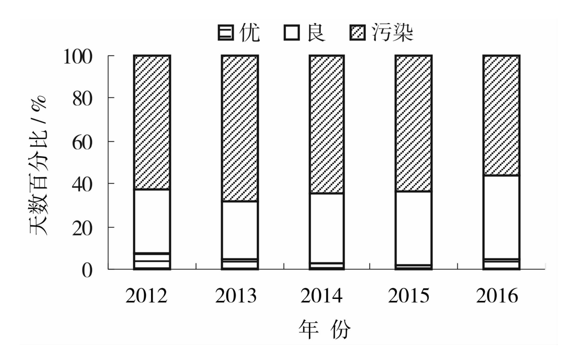


图 2 2012—2016 年上海市空气质量处于优、良和污染状态下的天数比例(以美国标准)

Fig. 2 Proportions of days on which Shanghai is in excellent, good and polluted air quality status during 2012—2016 (based on American standard)

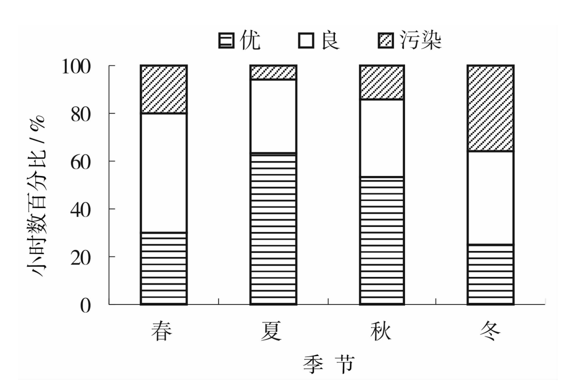


图 3 2012—2016 年上海市处于优、良和污染状态下的小时数百分比(季节分布)

Fig. 3 Proportions of hours in which Shanghai is in excellent, good and polluted status during 2012—2016 (seasonal distribution)

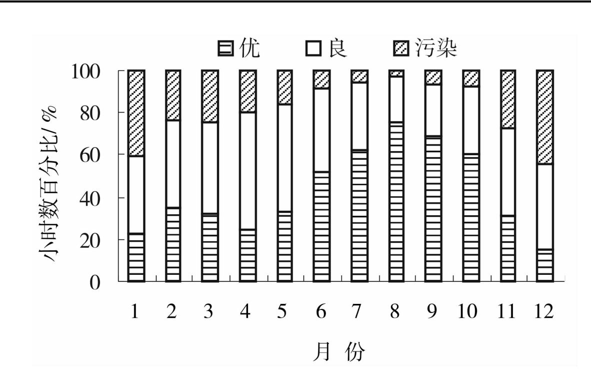


图 4　2012—2016 年上海市处于优、良和污染状态下的小时数百分比(月分布)

Fig. 4　Proportions of hours in which Shanghai is in excellent, good and polluted status during 2012—2016 (monthly distribution)

间基本相同的 4 个季节。图 3 反映了不同季节的平均空气质量情况。其中,空气为优的小时数比例在夏季最高(63%),在冬季最低(25%),而空气处于污染状态的小时数则在冬季最高(36%),在夏季最低(6%)。春季和秋季为过渡期。在此基础上,图 4 更加细致地反映了不同月份的平均空气质量情况。其中,8 月的空气质量最佳,空气质量为优的小时数高达 75%,污染的小时数仅占 2%。12 月的空气质量最劣,空气质量仅有 31% 的小时数达到优的水平,而污染的小时数则高达 27%。

图 5 反映了 2012—2016 年的 $PM_{2.5}$ 季节平均浓度变化。夏季 $PM_{2.5}$ 平均浓度最低,处于 30 ~ 36 μg · m^{-3} 的范围内,5 a 平均值为 32.57 μg · m^{-3}。冬季 $PM_{2.5}$ 平均浓度最高,处于 61 ~ 97 μg · m^{-3} 的范围内,5 a 平均值为 74.22 μg · m^{-3}。这一变化趋势与图 4 所反映的不同季节空气质量情况吻合。此外,秋、冬两季不同年份 $PM_{2.5}$ 平均浓度的变化范围大于春、夏两季。为了更细致地探究 $PM_{2.5}$ 浓度的年变化规律,又以月为单位,计算了 $PM_{2.5}$ 浓度的月平均值,并作同样的分析(图 6)。结果表明,8 月的 $PM_{2.5}$ 平均浓度最低,处于 16 ~ 36 μg · m^{-3} 的范围内,5 a 平均值为 25.51 μg · m^{-3}。12 月 $PM_{2.5}$ 平均浓度最高,处于 64 ~ 122 μg · m^{-3} 的范围内,五年平均值为 85.87 μg · m^{-3}。一年中,从 2 ~ 7 月,不同年份的 $PM_{2.5}$ 月平均浓度变化范围较小,而其他月份的 $PM_{2.5}$ 月平均浓度变化范围较大。

2.1.3　日变化情况　以小时为时间尺度,计算 2012—2016 年每天的 24 h 平均 $PM_{2.5}$ 浓度,以此来分析上海市 $PM_{2.5}$ 浓度的日内变化规律。

上海市 $PM_{2.5}$ 浓度日变化呈双峰双谷结构(图 7),浓度峰值出现于 8 ~ 9 时和 19 ~ 20 时,且后者浓度更高。两个浓度峰值都出现于上海交通的早高峰和晚高峰时段,且类似的日变化结构同样出现在南京[7]、广州[8]、北京[9]等大城市,说明该结构与上海的城市交通运行、人类生活相关。汽车尾气的集中排放,能够导致 $PM_{2.5}$ 浓度升高。

此结构的另一成因是逆温层。长期观测资料显

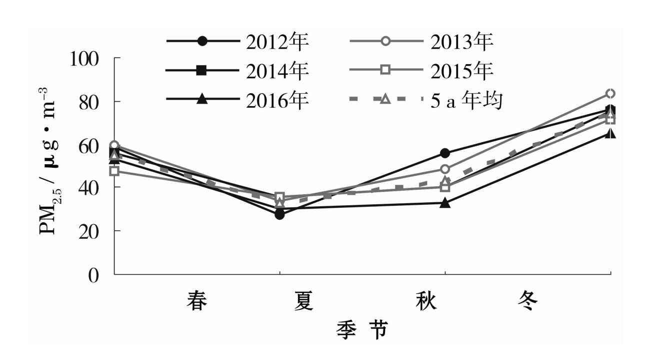


图 5　2012—2016 年上海市 $PM_{2.5}$ 浓度的季节平均值分布

Fig. 5　Distribution of seasonal average of the concentration of $PM_{2.5}$ in Shanghai during 2012—2016

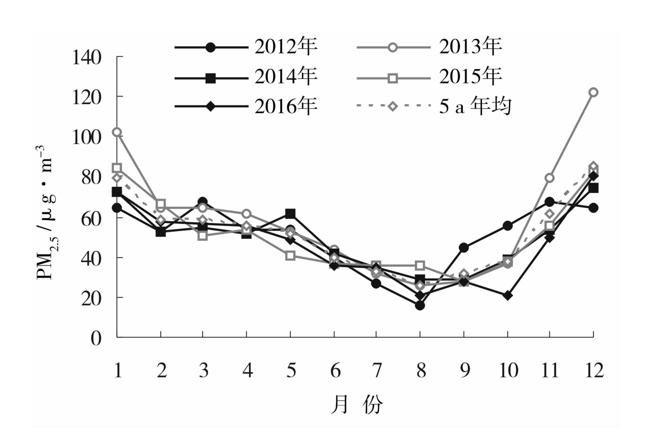


图 6　2012—2016 年上海市 $PM_{2.5}$ 浓度的月平均值分布

Fig. 6　Distribution of monthly average of the concentration of $PM_{2.5}$ in Shanghai during 2012—2016

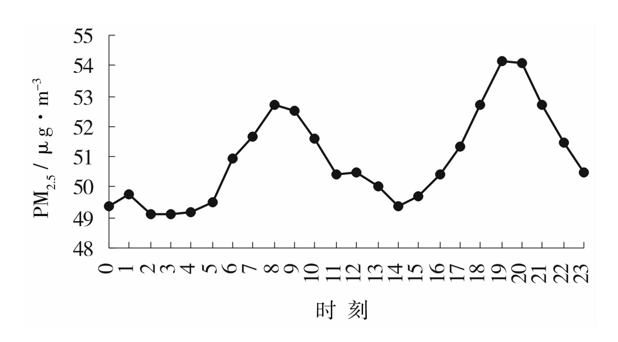


图 7　2012—2016 年上海市 $PM_{2.5}$ 浓度日变化图

Fig. 7　Daily variation of the concentration of $PM_{2.5}$ in Shanghai during 2012—2016

示,上海逆温层经常出现于 8 时和 20 时,且冬季逆温层出现次数最多,强度亦最大[10]。在逆温层条件下,较暖的空气位于较冷的空气之上,空气层结稳定,对流受限,有助于 $PM_{2.5}$ 在逆温层控制范围内累积。

2.2 $PM_{2.5}$浓度与气象因素的相关性分析

$PM_{2.5}$的产生及其浓度变化受多种因素的影响和制约,前述上海市 $PM_{2.5}$质量浓度的变化规律亦是多种因素综合影响的结果,考虑到上海地理位置的特殊性,本研究拟从气象因素尤其是风力风向及降水来分析其影响规律。

若控制某一气象因素保持不变,在其它气象因素的共同作用下,$PM_{2.5}$浓度将会不固定。此外,$PM_{2.5}$的输入量亦非时时相同,这同样将会影响 $PM_{2.5}$浓度。因此,为了探究某个气象因素对 $PM_{2.5}$浓度的影响,采用偏相关统计分析,其它气象因素保持不变。在本研究中,除作为研究对象的气象因素以外,其它气象因素均控制为有利于 $PM_{2.5}$浓度最大化的气象条件,亦即在任意一个气象因素值对应的诸多 $PM_{2.5}$浓度值中,取最大 $PM_{2.5}$浓度,以此研究该气象因素与 $PM_{2.5}$浓度的关系。

2.2.1 气温与 $PM_{2.5}$浓度 图 8 反映气温和 $PM_{2.5}$浓度的关系。2012—2016 年,上海市的气温变化范围是 -8 ~ 40 ℃,而 $PM_{2.5}$浓度最大值出现在 9.8 ℃。以这一气温为阈值,取各气温条件下 $PM_{2.5}$浓度的最大值,则可发现,当气温低于 9.8 ℃时,$PM_{2.5}$浓度随气温的升高而增大;当气温高于 9.8 ℃时,$PM_{2.5}$浓度随气温的升高而减小(图 9)。

当气温低于 9.8 ℃时,气温与 $PM_{2.5}$浓度的相关系数为 0.711,通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验,为高度线性正相关,说明气温越高,$PM_{2.5}$浓度越高。当气温高于 9.8 ℃时,气温与 $PM_{2.5}$浓度的相关系数为

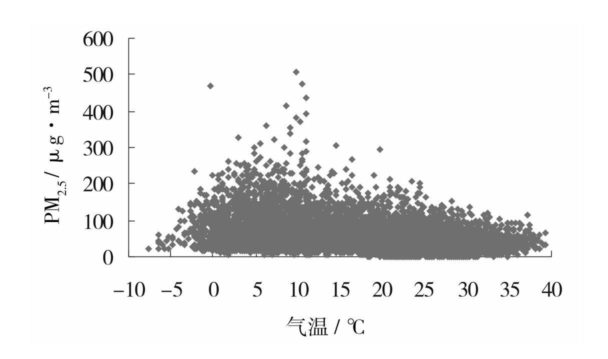


图 8 2012—2016 年上海市 $PM_{2.5}$浓度与气温关系图

Fig. 8 Relationship between the concentration of $PM_{2.5}$ and air temperature in Shanghai during 2012—2016

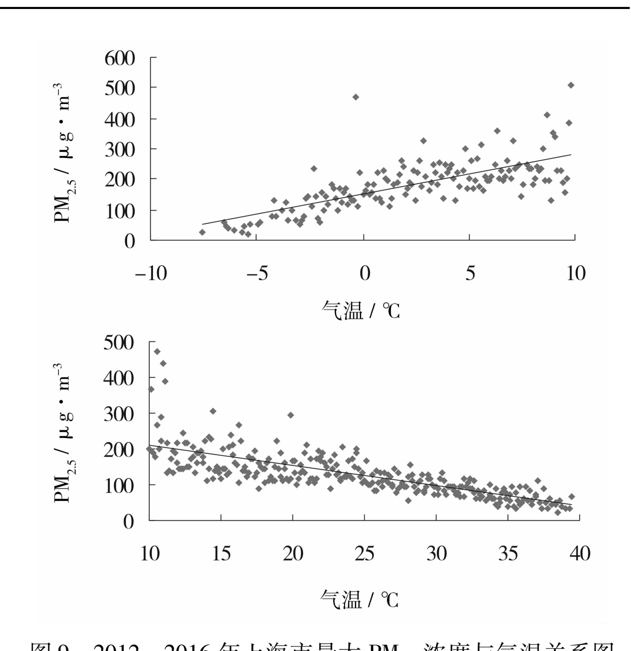


图 9 2012—2016 年上海市最大 $PM_{2.5}$浓度与气温关系图

Fig. 9 Relationship between the maximum concentration of $PM_{2.5}$ and air temperature in Shanghai during 2012—2016

-0.761,通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验,为高度线性负相关,说明气温越高,$PM_{2.5}$浓度越低。上海夏季气温较高,冬季气温较低,因此该现象与 2.1.2 中介绍的上海市 $PM_{2.5}$浓度年变化规律相符。

当气温处于 9.8 ℃附近时,上海处于冬季,大气对流较弱,大气边界层偏低。同时,逆温现象亦在冬季加剧,增强大气稳定度[11]。在此条件下,$PM_{2.5}$难以扩散稀释,因此浓度偏高。在气温低于 9.8 ℃的条件下,气温的降低往往伴随着强冷空气活动,而后者打破大气状态的稳定性,有利于 $PM_{2.5}$扩散稀释。以典型值为例,在图 9 中 -7 ℃对应的 2016 年 1 月末北极涡旋南移而引发的强烈寒潮事件中,在 12 h 内,空气质量级别从污染提升至优。气温高于 9.8 ℃,并随着气温逐渐升高,大气边界层不断抬高,扩释空间增大,大气对流加强,有利于 $PM_{2.5}$的稀释扩散。

2.2.2 气压与 $PM_{2.5}$浓度 图 10 反映了气压和 $PM_{2.5}$浓度的关系。2012—2016 年,上海市的气压变化范围是 985.39 ~ 1 041.2 hPa,而 $PM_{2.5}$浓度最大值出现在 1 021.6 hPa。以该气压为阈值,取各气压条件下 $PM_{2.5}$浓度的最大值,则可发现,当气压低于 1 021.6 hPa 时,$PM_{2.5}$浓度随气压的升高而增大;当气压高于 1 021.6 hPa 时,$PM_{2.5}$浓度随气压的升高而减小(图 11)。

当气压低于1021.6hPa时,气压与 $PM_{2.5}$浓

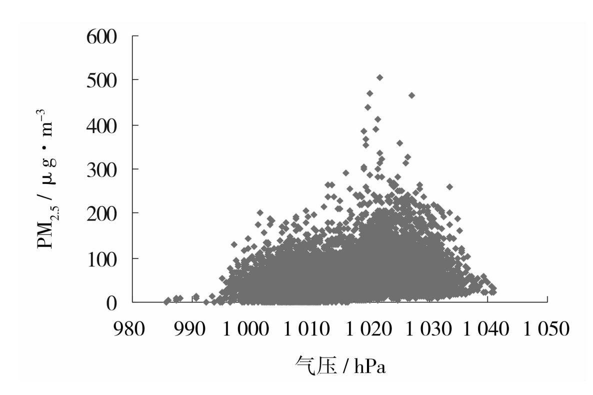


图 10　2012—2016 年上海市 $PM_{2.5}$ 浓度与气压关系图

Fig. 10　Relationship between the concentration of $PM_{2.5}$ and atmospheric pressure in Shanghai during 2012—2016

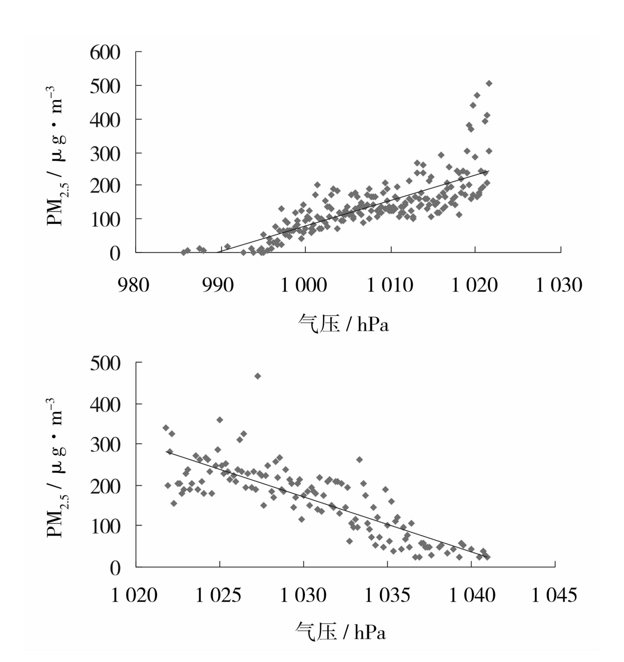


图 11　2012—2016 年上海市最大 $PM_{2.5}$ 浓度与气压关系图

Fig. 11　Relationship between the maximum concentration of $PM_{2.5}$ and atmospheric pressure in Shanghai during 2012—2016

度的相关系数为 0.770，通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验，为高度线性正相关，说明气压越高，$PM_{2.5}$ 浓度越高。当气压高于 1 021.6 hPa 时，气压与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关系数为 -0.814，通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验，为高度线性负相关，说明气压越高，$PM_{2.5}$ 浓度越低。上海夏季气压较低，冬季气压较高，因此该现象与 2.1.2 中介绍的上海市 $PM_{2.5}$ 浓度年变化规律相符。

当气压处于 1 021.6 hPa 附近时，上海基本处于冬季，较高的气压容易使空气大范围下沉，从而形成逆温层，增强大气稳定度，天气稳定少变，不利于 $PM_{2.5}$ 扩散稀释[12]。在气压低于 1 021.6 hPa 的条件下，气压偏低往往会导致强对流天气活动。而作为华东沿海城市，上海气压降低的现象又经常与热带气旋有关。这两种情况都将导致大气处于不稳定状态，利于 $PM_{2.5}$ 扩散稀释。以典型值为例，在图 11 中 985.3 hPa 对应的 2015 年 7 月“灿鸿”台风事件中，$PM_{2.5}$ 浓度在气压最低时下降到了 1 $\mu g \cdot m^{-3}$。在气压高于 1 021.6 hPa 的条件下，气压的升高往往伴随着强冷空气活动。如前所述的 2016 年 1 月末寒潮事件中，巨大的气压梯度所产生的强风将有助于 $PM_{2.5}$ 的扩散。而冷高压的下沉气流，不断将高空的清洁空气输送至近地面，使冷高压控制区内的空气质量得以极大改善。

2.2.3　相对湿度与 $PM_{2.5}$ 浓度　图 12 反映了相对湿度和 $PM_{2.5}$ 浓度的关系。2012—2016 年，上海市的相对湿度变化范围是 13% ~99%，而 $PM_{2.5}$ 浓度最大值出现在 83%。以该相对湿度为阈值，取各相对湿度条件下 $PM_{2.5}$ 浓度的最大值，则可发现，当相对湿度低于 83% 时，$PM_{2.5}$ 浓度随相对湿度的升高而增大；当相对湿度高于 83% 时，$PM_{2.5}$ 浓度呈下降趋势，但有所波动（图 13）。

当相对湿度低于 83% 时，相对湿度与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关系数为 0.844，通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验，为高度线性正相关，说明相对湿度越高，$PM_{2.5}$ 浓度越高。当相对湿度高于 83% 时，相对湿度与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关系数为 -0.445，通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验，为显著线性负相关，说明相对湿度越高，$PM_{2.5}$ 浓度越低。

在相对湿度低于 83% 的条件下，相对湿度的增加会导致更多的水汽凝结于颗粒物表面，形成雾滴后沉于大气低层，使颗粒物长时间停留在大气中，不利于扩散稀释。而在相对湿度高于 83% 的条件下，相对湿度的增加往往伴随着降水的发生。降水可以有效清除空气中的 $PM_{2.5}$，因此极高的相对湿度并不

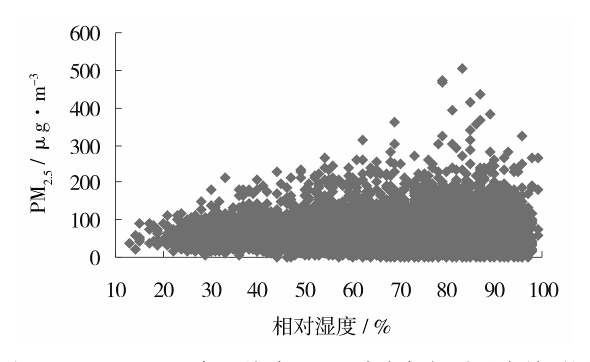


图 12　2012—2016 年上海市 $PM_{2.5}$ 浓度与相对湿度关系图

Fig. 12　Relationship between the concentration of $PM_{2.5}$ and relative humidity in Shanghai during 2012—2016

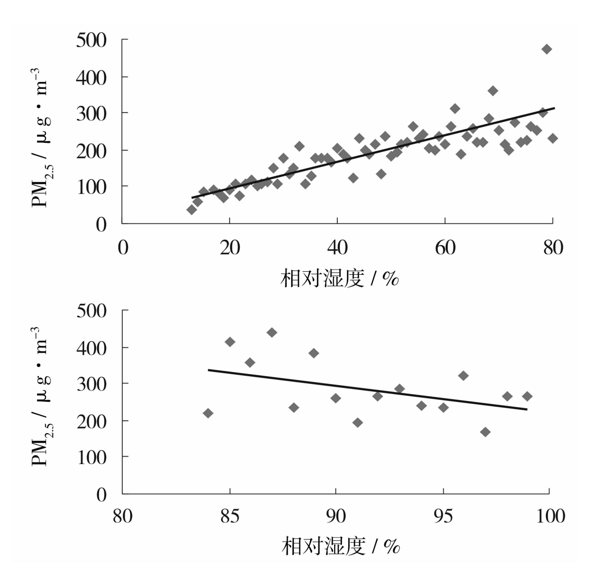


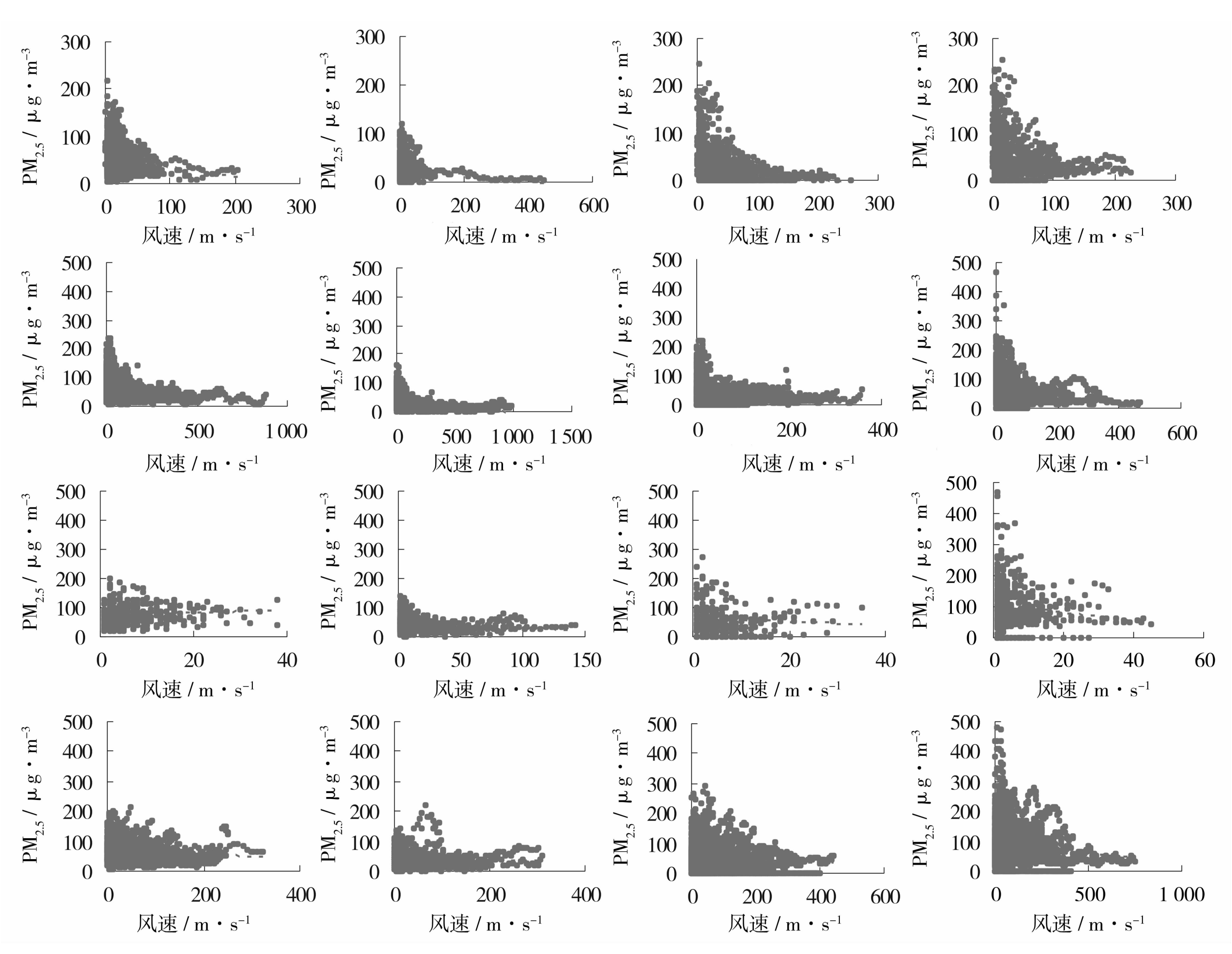
图 13　2012—2016 年上海市最大 $PM_{2.5}$ 浓度与相对湿度关系图

Fig. 13　Relationship between the maximum concentration of $PM_{2.5}$ and relative humidity in Shanghai during 2012—2016

对应 $PM_{2.5}$ 的高浓度值。

2.2.4　风与 $PM_{2.5}$ 浓度　风因素主要考虑风向和风速。风向多变(Varying)和无风(No Wind)所占比例不高,且风向多变时的对应风速不大,因此仅考虑风向固定时的风向与风速对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响。结合上海风向分布规律,将气象学定义的 16 个风向统合为 4 个主要风向:东北风(包括观测结果中的东北偏北、东北及东北偏东风),东南风(包括观测结果中的东、东南偏东、东南、东南偏南及南风),西南风(包括观测结果中的西南偏南、西南及西南偏西风),和西北风(包括观测结果中的西、西北偏西、西北、西北偏北及北风)。某一时刻的累积风速是该时刻之前同一风向下的持续风速之和,若风向改变,则累积风速归零[13]。与实时风速相比,累积风速对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响更为明显。

图 14 反映了不同季节、不同风向条件下累积风



注:从左往右依次为春季,夏季,秋季和冬季;从上往下依次为东北风,东南风,西南风和西北风

图 14　2012—2016 不同季节、不同风向条件下上海市 $PM_{2.5}$ 浓度与累积风速关系图

Fig. 14　Relationship between the concentration of $PM_{2.5}$ and cumulative wind speed in Shanghai during 2012—2016 divided into different seasons and different wind directions

速和 $PM_{2.5}$浓度的关系。总体而言，当累积风速增大时，$PM_{2.5}$浓度均趋于下降，表明任何风向下的持续风，均对 $PM_{2.5}$具有明显的清除效果。对于东北风和东南风，随着累积风速的增大，$PM_{2.5}$浓度呈递减趋势，且在春季和夏季较为显著。当东北风和东南风的累积风速达到 350 $m \cdot s^{-1}$以上时，$PM_{2.5}$浓度基本减少至 35 $\mu g \cdot m^{-3}$。而对于西南风和西北风，累积风速的增大并不一定能导致 $PM_{2.5}$浓度的下降，在累积风速的增大过程中，$PM_{2.5}$浓度存在小范围的上升现象，这在秋季和冬季更为显著。因此西南风和西北风的累积风速不存在能使 $PM_{2.5}$浓度减少至 35 $\mu g \cdot m^{-3}$以下的显著阈值。同时，$PM_{2.5}$浓度与累积风速呈对数关系。据此推求出最大 $PM_{2.5}$浓度与累积风速自然对数的相关系数(表 1)。其中，各相关系数均通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。

表 1 不同季节、不同风向条件下上海市最大 $PM_{2.5}$浓度与累积风速自然对数的相关系数

Tab. 1 Coefficients of correlation between the maximum concentration of $PM_{2.5}$ and the natural logarithm of cumulative wind speed in Shanghai in different seasons and different wind directions

	春	夏	秋	冬
东北风	-0.898	-0.837	-0.858	-0.852
东南风	-0.877	-0.876	-0.875	-0.776
西南风	-0.706	-0.768	-0.808	-0.908
西北风	-0.692	-0.462	-0.775	-0.797

从表 1 可以看出，某一季节、某一风向下，风对 $PM_{2.5}$的清除效果。表 1 的相关系数中大部分小于 -0.7，表明累积风速的自然对数与 $PM_{2.5}$浓度呈高度负相关，这与 $PM_{2.5}$浓度和累积风速关系图相吻合。而对数关系相较于其他线性关系，累积风速对 $PM_{2.5}$具有更强的清除作用。

上海地处华东沿海，且春夏季节盛行东北风和东南风，此两种风向均来自海洋，携带的 $PM_{2.5}$浓度较低，因此东北风和东南风都对上海的 $PM_{2.5}$有较强的清除作用。而来自大陆的西南风和西北风，在流动过程中极易携带大量 $PM_{2.5}$，故其清除作用不及东北风和东南风。在图 14 中，西南风和西北风累积风速的增加，时常伴随 $PM_{2.5}$浓度在一定范围内的升高。这表明西南风和西北风易加重上海 $PM_{2.5}$污染。在冬季，上海主要受来自北方大陆的西北季风控制。西北季风途径华北平原时，将华北重工业区的高浓度 $PM_{2.5}$颗粒输往包括上海在内的南方地区，这是上海冬季 $PM_{2.5}$浓度偏高的重要原因之一[14]。但另一方面，与其它风向类似，长时间、高强度的持续西北风亦可缓解 $PM_{2.5}$污染。由于秋冬季节，上海的东北风和东南风比例偏小，西北季风便成为秋冬季节上海 $PM_{2.5}$浓度下降的主要影响因素之一。但其清除效果总体不如春夏季节的东北风和东南风。

2.2.5 降水量与 $PM_{2.5}$浓度 图 15 反映了降水量和 $PM_{2.5}$浓度的关系。2012—2016 年，上海市的降水量范围是 0 ~ 80 mm，而 $PM_{2.5}$浓度最大值出现在 0 mm。降水的发生可以显著减少 $PM_{2.5}$浓度。取各降水量条件下 $PM_{2.5}$浓度的最大值，则可发现 $PM_{2.5}$浓度随降水量的增大而减小(图 16)。

从图 16 中可以发现，最大 $PM_{2.5}$浓度与降水量之间具有对数关系。对降水量取自然对数，发现最大 $PM_{2.5}$浓度与降水量对数的相关系数为 -0.875，为高度线性负相关，并且通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验，说明降水量越大，$PM_{2.5}$浓度越低。同时，降水对 $PM_{2.5}$具有更强的清除作用。一次 11 mm 的降水即可使 $PM_{2.5}$浓度下降至 75 $\mu g \cdot m^{-3}$以下，而一次 18 mm 的降水可使 $PM_{2.5}$浓度下降至 35 $\mu g \cdot m^{-3}$以

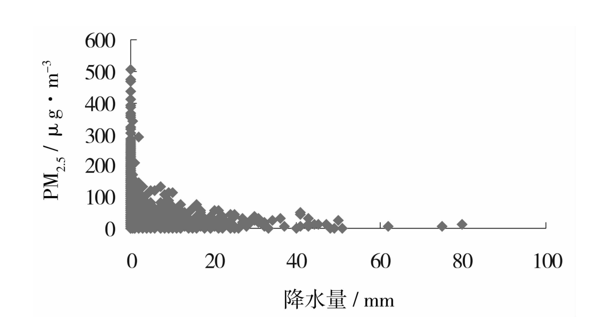


图 15 2012—2016 年上海市 $PM_{2.5}$浓度与降水量关系图

Fig. 15 Relationship between the concentration of $PM_{2.5}$ and precipitation in Shanghai during 2012—2016

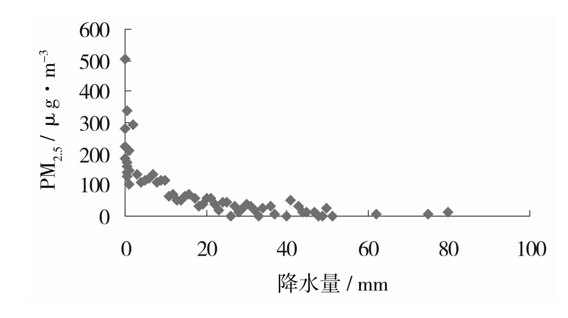


图 16 2012—2016 年上海市最大 $PM_{2.5}$浓度与降水量关系图

Fig. 16 Relationship between the maximum concentration of $PM_{2.5}$ and precipitation in Shanghai during 2012—2016

下。上海的降水主要集中于夏季,这也是夏季 $PM_{2.5}$ 低的气象因素。

3 结 论

本研究通过对上海市 2012—2016 年 $PM_{2.5}$浓度和气温、气压、相对湿度、风向、风速及降水量进行整理统计,采用定性分析和定量计算以及各因素之间的相关性分析,得到以下结论:

(1) 研究采用年、季、月、小时的时间尺度,能有效分析 2012—2016 年上海 $PM_{2.5}$浓度的变化特征,研究成果揭示了上海市 $PM_{2.5}$浓度的总体情况以及其年内、日内的变化规律。典型如,上海 $PM_{2.5}$浓度日变化具有双峰双谷结构,其中两个浓度峰值分别位于 8 ~9 时和 19 ~20 时,后者浓度更高。

(2) 研究表明,气象因子对上海市 $PM_{2.5}$浓度具有显著影响,各气象因子与 $PM_{2.5}$浓度具有较好的相关性。通过相关分析,能够定量的获得 $PM_{2.5}$浓度突变处某气象因子的阈值。

(3) 按风向来区分累积风速在上海 $PM_{2.5}$浓度变化研究中尚属首次,研究表明该方法具有较强的实用性,对 $PM_{2.5}$浓度的预测预报具有积极意义。

参考文献(References)

[1] 侯美伶,王杨君. 灰霾期间气溶胶的污染特征[J]. 环境监测管理与技术,2012,24(2):6 –11. [HOU Meiling,WANG Yangjun. Pollution characteristics of aerosols during haze period[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring,2012,24(2):6 –11.]

[2] 李宗恺. 空气污染气象学原理及应用[M]. 北京:气象出版社,1985. [LI Zongkai. Theory on air pollution meteorology and application[M]. Beijing:Meteorology Press,1985.]

[3] 孟燕军,程丛兰. 影响北京大气污染物变化的地面天气形势分析[J]. 气象,2002,28(4):42 – 47. [MENG Yanjun,CHENG Conglan. Impact of surface synoptic situations on air pollution in Beijing area and pollution characteristics of aerosols during haze period[J]. Meteorological Monthly,2002,28(4):42 –47.]

[4] 国家环境保护局. GB 3095—2012 环境空气质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2012. [National Environmental Protection Agency. GB 3095—2012 Ambient air quality standards[S]. Beijing:China Environmental Press,2012.]

[5] 杨晓波,杨旭峰,李新. 国内外环境空气质量标准对比分析[J]. 环保科技,2013,19(5):16 – 19. [YANG Xiaobo,YANG Xufeng,LI Xin. Comparison of environmental air quality standards in China and abroad[J]. Environmental Protection and Technology,2013,19(5):16 –19.]

[6] US EPA. National ambient air quality standards (NAAQS) [EB/OL][M]. Washington DC:US EPA,Office of Air Quality Planning and Standards,2012.

[7] 张新玲,张利民,李子华. 南京市可吸入颗粒物数浓度变化及尺度分布[J]. 江苏环境科技,2003,16(4):33 –34. [ZHANG Xinling,ZHANG Limin,LI Zihua. Variety of quantity concentrations and size distributions of inhalation particulates in Nanjing [J]. Jiangsu Environmental Scienceand Technology,2003,16(4):33 –34.]

[8] 陈丹青,师建中,肖亮洪,等. 粤东三市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度分布特征[J]. 中山大学学报(自然科学版),2012,51(4):73 –78. [CHEN Danqing,SHI Jianzhong,XIAO Lianghong,et al. The distribution and concentration of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in three cities of Eastern Guangdong[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2012,51(4):73 –78.]

[9] 于建华,虞统,魏强,等. 北京地区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度的变化特征[J]. 环境科学研究,2004,17(1):45 – 47. [YU Jianhua,YU Tong,WEI Qiang,et al. Characteristics of mass concentration variations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Beijing area[J]. Research of Environmental Sciences,2004,17(1):45 –47.]

[10] 郑庆锋,史军. 上海地区大气贴地逆温的气候特征[J]. 干旱气象,2011,29(2):195 – 200. [ZHENG Qingfeng,SHI Jun. Temperature inversion characteristics of lower atmosphere over Shanghai[J]. Arid Meteorology,2011,29(2):195 –200.]

[11] 谈荣华,张元茂,郑叶飞,等. 上海市城区典型居民住宅区 $PM_{2.5}$ 的污染状况分析[J]. 环境与职业医学,2004,21(3):226 –229. [TAN Ronghua,ZHANG Yuanmao,ZHENG Yefei,et al. Pollution research on $PM_{2.5}$ in typical urban resident area in Shanghai[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine,2004,21(3):226 –229.]

[12] 陈阳,曾钰,张琴,等. 气象因素对长沙市 $PM_{2.5}$ 周期性变化规律的影响分析[J]. 四川环境,2014,33(6):81 – 87. [CHEN Yang,ZENG Yu,ZHANG Qin,et al. Study on the influence of meteorological factors on $PM_{2.5}$ periodic variation in Changsha City [J]. Sichuan Environment,2014,33(6):81 –87.]

[13] LIANG Xuan,ZOU Tao,GUO Bin,et al. Assessing Beijing's $PM_{2.5}$ pollution:Severity,weather impact,APEC and winter heating[J]. Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences,2015,471(2182):20150257.

[14] 朱敏,陈海宇,张骁君. 上海市青浦区 PM_{10} 污染状况及其与气象要素的关系[J]. 中国环境管理,2012,(1):7 – 11. [ZHU Min,CHEN Haiyu,ZHANG Yaojun. The seasonal variety of PM_{10} and its relationship with meteorological condition in Qingpu District Shanghai[J]. Chinese Journal of Environmental Management,2012,(1):7 –11.]

Characteristics of $PM_{2.5}$ concentration variability and its meteorological factors in Shanghai

WANG Yi-di[1,2], WANG Zhen-xiang[3]

(1 *School of Geographic Sciences, East China Normal University*, *Shanghai* 200241, *China*;

2 *Dept of Ecosystem Science and Sustainability*, *Colorado State University*, *CO* 80521, *United States*;

3 *Yangtze Estuary Hydrology and Water Resources Survey Bureau*, *Shanghai* 200136, *China*)

Abstract: This paper systematically analyzes the temporal variability of the mass concentration of $PM_{2.5}$ in Shanghai, and discusses the effects of meteorological factors on the concentration of $PM_{2.5}$. It reveals the temporal variability of the $PM_{2.5}$ concentration and the status of atmospheric pollution in recent years in Shanghai through multi-scale statistics, qualitative analysis and quantitative computation on meteorological data provided by China Air Quality Online Monitoring and Analysis Platform, as well as China Meteorological Administration. The correlation analysis is applied in understanding the relationship between the $PM_{2.5}$ concentration and meteorological factors (the temperature, air pressure, the relative humidity, wind direction, wind speed and precipitation) in Shanghai from 2012 to 2016. The results showed that most of the time the air quality in Shanghai has been good or excellent in recent 5 years and the number of days when it was suffered from the pollution has been decreasing. The $PM_{2.5}$ concentration displayed a seasonal feature which indicated a lower value in the summer and a higher value in the winter with the lowest value in August of 16 ~ 36 $\mu g \cdot m^{-3}$. The daily variation shows a structure of two peaks and two valleys, with the concentration peaks occurred during 8:00 AM to 9:00 AM and 7:00 PM to 8:00 PM higher during the latter period. The thresholds of the temperature, the air pressure and the relative humidity were 9.8 ℃, 1 021.6 hPa and 83% respectively which were normally the inflection points of the $PM_{2.5}$ concentration. There was a logarithmic relationship between the maximum $PM_{2.5}$ concentration and the accumulated wind speed and precipitation. When the accumulated wind speed of northeaster and southeaster reached 350 $m \cdot s^{-1}$, the $PM_{2.5}$ concentration was decreased to 35 $\mu g \cdot m^{-3}$. The bigger the precipitation was, the lower the concentration of $PM_{2.5}$ became. This paper showed a good correlation between meteorological factors and the concentration of $PM_{2.5}$, and its numerical model had a positive effect on the prediction of the concentration of $PM_{2.5}$ and the treatment for atmospheric environment.

Key words: $PM_{2.5}$ concentration; pollution characteristics; meteorological factors; correlation